

# 基于等效叠栅的反射式光刻对准模型研究

朱江平<sup>1,2,3</sup> 胡松<sup>1</sup> 于军胜<sup>2</sup> 唐燕<sup>1</sup> 周绍林<sup>4</sup> 刘旗<sup>1,3</sup> 何渝<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209  
<sup>2</sup>电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054  
<sup>3</sup>中国科学院研究生院, 北京 100049  
<sup>4</sup>华南理工大学电子与信息学院, 广东 广州 610540

**摘要** 针对接近接触式光刻技术的特点,提出了一种实用的反射式光刻对准方案。方案采用差动叠栅条纹对准技术,以叠栅条纹相位作为对准信号的载体。在掩模和硅片上分别设计两组位置相反、周期接近的光栅对准标记。电荷耦合器件(CCD)成像系统接收叠栅条纹图像,采用傅里叶变换提取叠栅条纹相位,得到掩模与硅片的相对位置关系。设计的标记可同时探测横纵方向的对准偏差。给出了合理的光路设计方案,详细分析了整个系统对准的内在机制,建立了可行的数学模型。研究表明,当对准偏差小于 1 pixel 时,最大误差低于 0.002 pixel。与透射式光路对比,该方案更具有实用性,满足实际对准的要求。

**关键词** 光栅;光刻对准;反射式光路;叠栅条纹;光栅标记

中图分类号 O436.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0909001

## Alignment Scheme Research Based on Equivalent Overlapped Gratings for Reflective Lithography Alignment

Zhu Jiangping<sup>1,2,3</sup> Hu Song<sup>1</sup> Yu Junsheng<sup>2</sup> Tang Yan<sup>1</sup> Zhou Shaolin<sup>4</sup>  
Liu Qi<sup>1,3</sup> He Yu<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Institution of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China  
<sup>2</sup>School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China  
<sup>3</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China  
<sup>4</sup>School of Electronic and Information, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 610540, China

**Abstract** According to the technology characteristics of proximity and contact lithography, a practical reflective lithography alignment scheme is proposed. The differential Moiré fringe alignment technology is adopted in the scheme and alignment signal is carried in phase of Moiré fringe. Two sets of grating marks with placed oppositely direction and similar periods are designed on the mask and wafer, respectively. Charge coupled device imaging system is used to receive Moiré fringe image. Then, the relative position relationship can be obtained using Fourier transform to extract Moiré fringe phase. The designed marks could also detect position offset on the vertical and horizontal directions. The reasonable designed scheme of optical path is schematically given, the internal mechanism of the whole system alignment is analyzed in details, and the feasible mathematical model is established. This research results show that the maximum error is less than 0.002 pixel when alignment offset is less than 1 pixel. Compared with light path of transmission-type, the scheme is more practical, satisfying the requirements of the practical alignment.

收稿日期: 2012-04-20; 收到修改稿日期: 2012-05-14

基金项目: 国家自然科学基金(60976077,61076099)资助课题。

作者简介: 朱江平(1984—),男,博士研究生,主要从事光刻对准与工艺方面的研究。E-mail: zsyioe@163.com

导师简介: 胡松(1965—),男,研究员,博士生导师,主要从事微电子总体专用设备方面的研究。

E-mail: husong@ioe.ac.cn

**Key words** gratings; lithography alignment; reflective optical path; Moiré fringe; grating marks

**OCIS codes** 050.2770; 050.1970; 070.4790

## 1 引 言

光刻技术的研究与开发在集成电路技术的制造中起着极其重要的作用,不断缩小的特征尺寸推动着分辨力不断提高。此外,纳米器件作为纳米技术的基础,其制造手段离不开高分辨力的光刻技术。作为光学元件的主要加工手段,光学微纳加工技术的不断革新促进了纳米科技的飞速发展。

对准技术是表征光刻系统整体性能的一个重要指标,一般要求对准精度为特征尺寸的 1/10。随着特征尺寸的不断减小,对对准精度的要求也越来越苛刻,已经从亚微米量级进入到 10 nm 以下。

在纳米级光刻对准中,基于双光栅叠栅条纹光刻对准方法<sup>[1~3]</sup>,将硅片和掩模标记制作成周期接近的光栅。当平行光通过两接近光栅可以形成反映掩模与硅片位置信息的叠栅条纹,这种将掩模和衬底标记光栅的相对位置关系反映在叠栅条纹的相位信息中的方法,具有很好的抗干扰能力,可用于实现纳米级高精度对准。

先前的研究理论与对准模型,主要是以透射式光路为基础<sup>[1~7]</sup>。这种光路是一种近似的理想模型,将掩模与硅片上的光栅对准标记设计成透射式

的光栅<sup>[1~3]</sup>。这种结构比较容易形成叠栅条纹,但是对准光源和成像系统分别在光栅标记的两侧,从而使整机的体积庞大,不利于光刻机部件集成以及整体结构的优化。并且硅片经过抛光工艺处理后,具有高反射率、不透明的特点,透射式光栅标记显然不适宜制作在硅片上。因此,透射式的对准方案并不适用于实际的光刻对准需要。本文在透射式对准方案分析的基础上,建立一种实用的反射式光刻对准模型,设计可行的对准光路,以满足于接近接触式光刻对准的实际要求。

## 2 基本原理

接近接触式光刻对准中,采用的对准标记是光栅周期接近、排列顺序相反的两组拼接光栅,形成的两组相移叠栅条纹的移动方向相反<sup>[1~3]</sup>。如图 1(a),(b)所示,为对准中采用的光栅标记,其中图 1(a)是硅片上采用的光栅标记,周期为  $\{P_2, P_1\}$  ( $P_2 > P_1$ );图 1(b)是掩模上采用的光栅标记,周期为  $\{P_1, P_2\}$ 。在实际对准中,将采用排列方向互相垂直光栅标记以探测  $x, y$  两个方向的位移探测。

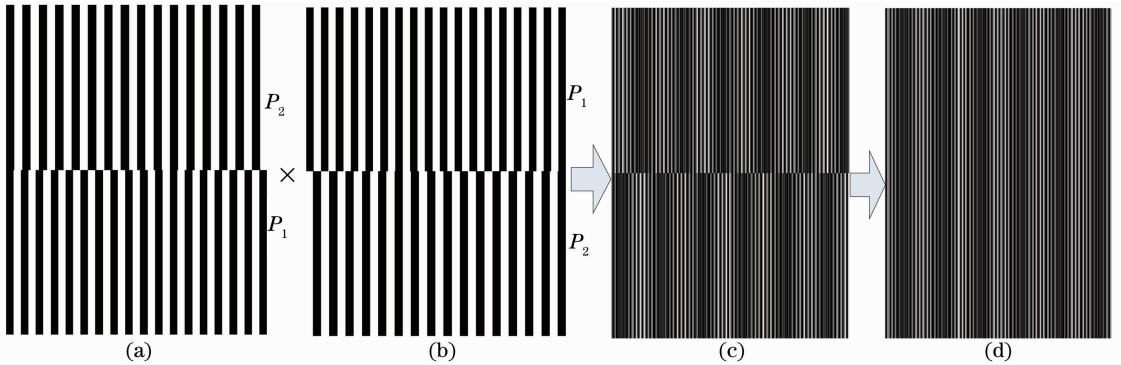


图 1 基本对准模型。(a)硅片对准标记;(b)掩模对准标记;(c)未对准叠栅条纹;(d)对准叠栅条纹

Fig. 1 Basic alignment model. (a) Alignment mark on the wafer; (b) alignment mark on the mask;

(c) misaligned Moiré fringes with displacement of  $\Delta x$ ; (d) aligned moiré fringes

以  $x$  方向对准为例,当掩模与硅片上的光栅对准标记同时处于初始坐标时,对于常用的  $(+1, -1)$  级叠栅条纹,叠栅条纹的周期可以写为

$$P_M = 1/(f_1 - f_2) = P_1 P_2 / (P_2 - P_1). \quad (1)$$

当硅片相对掩模存在偏移  $\Delta x$  时,如图 1(c)所示,上下两组条纹产生的相移分别为

$$\phi_{up} = 2\pi\Delta x / P_1, \quad \phi_{down} = -2\pi\Delta x / P_2. \quad (2)$$

由于上下两组条纹移动方向相反,其相位差为

$$\Delta\phi_M = \phi_{up} - \phi_{down} = 2\pi\Delta x (1/P_1 + 1/P_2), \quad (3)$$

那么,两组条纹的相对移动量与掩模和硅片间的位移偏差  $\Delta x$  关系为

$$\Delta X_M = \Delta X_{up} + \Delta X_{down} = \frac{P_1 + P_2}{P_2 - P_1} \Delta x. \quad (4)$$

因此,只要提取硅片相对于掩模偏移的叠栅条纹的相移差,就可通过(4)式计算硅片相对于掩模的对准偏差

$$\Delta x = \frac{\Delta\psi_M}{2\pi} \frac{\bar{P}}{2} = \frac{\Delta\psi_M}{2\pi(f_1 + f_2)}, \quad (5)$$

式中将  $\bar{P} = 2P_1P_2/(P_1 + P_2)$  定义为两差动光栅的平均周期,  $f_1 = 1/P_1, f_2 = 1/P_2$  代表光栅标记的频率。

图 1(d) 表示硅片相对掩模存在偏移  $\Delta x = 0$  时, 亦即掩模与硅片在该方向上处于完全对准状态时的叠栅条纹。y 方向以类似过程实现对准。

### 3 对准光路设计

基于双光栅叠栅条纹对准方法, 利用设计在掩模与硅片上的两组差动光栅标记叠加形成叠栅条纹, 探测掩模与硅片之间的相对位置关系。通常而言, 接近接触式光刻中, 掩模与硅片之间的相对间隔在  $5 \sim 40 \mu\text{m}$  之间。光栅间隙内的衍射效应忽略不计。掩模上的图形可以 1:1 地复制在硅片上。

#### 3.1 透射式对准光路

先前的理论分析主要采用的模型是透射式光路结构, 如图 2 所示。当一束经过准直的平行对准光 (AS) 通过透镜  $L_1$  与  $L_2$  后, 先通过硅片 W 上的光栅标记发生衍射, 通过硅片光栅标记的衍射光继续传播, 通过掩模 T 光栅标记, 在掩模光栅标记后面用电荷耦合器件 (CCD) 成像系统接收干涉叠栅条纹  $M_x$  和  $M_y$ 。通过对叠栅条纹  $M_x, M_y$  相位分析, 可以实现掩模 T 与硅片 W 在 x、y 两个方向的对准。这种对准模型结构简单, 叠栅条纹形成内在机制易于理解。

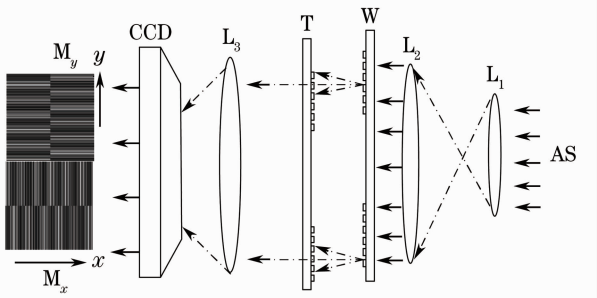


图 2 透射式对准光路

Fig. 2 Alignment optical path of transmission-style

#### 3.2 反射式对准光路

对准系统的可行性和实用性主要需要考虑对准信号的灵敏度、对准信号的测量范围以及信号的对比如度等。接近接触式光刻中, 掩模与硅片之间的间隙很小, 通常硅片经过抛光处理后, 具有高反射率的特性。同时, 位移工件台承载硅片移动与掩模实现准时, 无法利用透射光路结构。因此, 采用如图 2 所示的透射式对准光路是不可行的。根据这些特殊

需要, 提出了基于等效叠栅的反射式对准光路模型如图 3 所示。

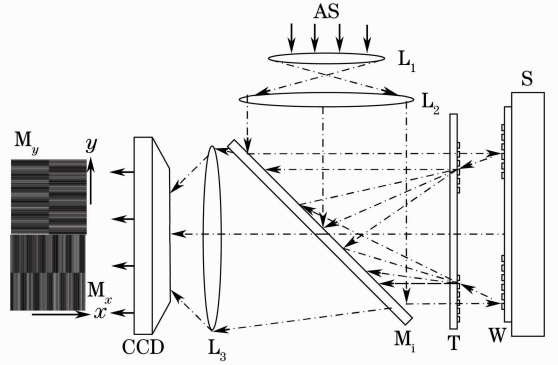


图 3 反射式对准光路

Fig. 3 Alignment optical path of reflection-style

图 3 中, 对准平行光 AS 通过透镜  $L_1$  和  $L_2$ , 经半反半透镜  $M_1$  反射, 穿过掩模 T 光栅对准标记后, 衍射光继续传播入射到硅片对准标记 W 发生干涉 (衍射) 并反射, 反射光穿过掩模 T 光栅对准标记再次衍射, 在掩模版 T 后面干涉叠加。因此, 整个对准系统等价于对准光经过了三个光栅标记, CCD 成像系统接收透过半反半透镜  $M_1$  并经透镜  $L_3$  放大的叠栅条纹图像  $M_x, M_y$ , 其光强分布有别于透射式光路。最后经过条纹图像分析, 得到掩模 T 与硅片 W 的相对位置关系, 实时反馈给位移工件台 S 实现 x、y 两个方向的对准偏差测量。

#### 3.3 反射式对准光路模型分析

为了便于分析, 假设硅片上的光栅对准标记不受光刻工艺的影响, 光栅的反射率函数可表示为

$$R_w = 0.5 + 0.5\cos(2\pi x/P_2), \quad (6)$$

式中  $P_2$  表示硅片上反射型光栅标记的周期。

掩模仍采用透射型的光栅标记, 其透射率函数可表示为

$$I_t = 0.5 + 0.5\cos(2\pi x/P_1), \quad (7)$$

式中  $P_1$  表示掩模上透射型光栅标记的周期。

根据 3.2 节的分析, 整个对准光路结构中, 等价于对准光通过了两次掩模光栅标记, 一次硅片光栅标记。根据 (6)、(7) 式可知, 最后 CCD 成像系统接收的条纹光强分布可以表示为

$$I_{\text{CCD}} = I_t \times R_w \times I_t = \frac{1}{8} \left\{ \frac{3}{2} + \cos(2\pi f_1 x) + \frac{3}{2} \cos(2\pi f_2 x) + \cos[2\pi(f_1 + f_2)x] + \cos[2\pi(f_1 - f_2)x] + \frac{1}{2} \cos[2\pi(2f_1)x] + \frac{1}{4} \cos[2\pi(2f_1 - f_2)x] + \frac{1}{4} \cos[2\pi(2f_1 + f_2)x] \right\}. \quad (8)$$

从(8)式可以看出反射式对准方案中, CCD 接收的条纹图像含有多种频率成分。其中,除了零频外,叠栅条纹对应的最低频率大小为

$$f_m = f_1 - f_2. \quad (9)$$

为此,反射式对准方案对应 8 种频率成分(零频未标出),各频率成分的大小和位置分布,如图 4 中的傅里叶频谱可以发现,与(8)式结论一致。CCD 成像系统接收的条纹具有更加丰富的频率信息。但是,仍然可以有效提取叠栅条纹对应的频率成分。对应的叠栅条纹(包括零频)光强分布可以表示为

$$I_M = \frac{3}{16} + \frac{1}{8} \cos 2\pi f_m x. \quad (10)$$

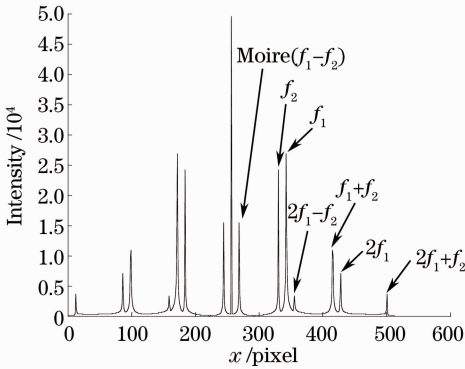


图 4 反射式对准频谱分析

Fig. 4 Frequency analysis of reflective alignment

## 4 应用与分析

基于上述分析,反射式对准方案条纹处理步骤如图 5 所示。反射式对准方案中,通过 CCD 成像系统获取包含对准信息的叠栅条纹,将上下两组条纹分割[以  $x$  方向对准为例,见图 1(c)]为两幅条纹,采用傅里叶相位提取方法解调两组条纹的相位,然后利用(5)式计算掩模与硅片之间的位移偏差,并反馈给工件台实现掩模与硅片之间的对准。利用假设掩模光栅对准标记的周期分别为 4 pixel、4.4 pixel,硅片光栅标记的周期为 4.4 pixel、4 pixel,CCD 成像系统采集的条纹大小为 512 pixel $\times$ 512 pixel。设定对准偏差的范围为  $\Delta x \in [0, 1]$  pixel,利用图 5 所示的处理步骤得到的计算结果如图 6 所示。图 6(a)为模拟计算的结果曲线,菱形点数据表示模拟计算结果,虚线表示线性拟合曲线;图 6(b)是实现线性拟合偏差的数据曲线;图 6(c)是理论值与模拟计算之间的误差曲线。图 6(a)~(c)数据显示,当对准偏差  $\Delta x < 1$  pixel 时,采用反射式光刻对准模型计算得到的误差标准差为 0.00065 pixel;平均

误差为 0.001 pixel;最大误差小于 0.002 pixel,与透射式光刻模型相比具有可比拟的精度。可见,采用反射式光刻对准模型同样可以达到较高的对准精度,满足实际光刻对准的需要。

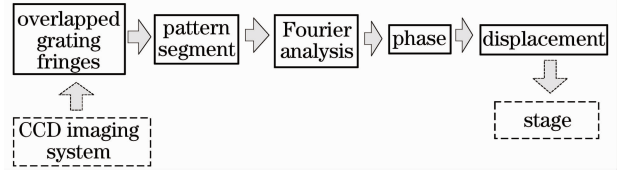


图 5 条纹处理步骤

Fig. 5 Steps of fringes process

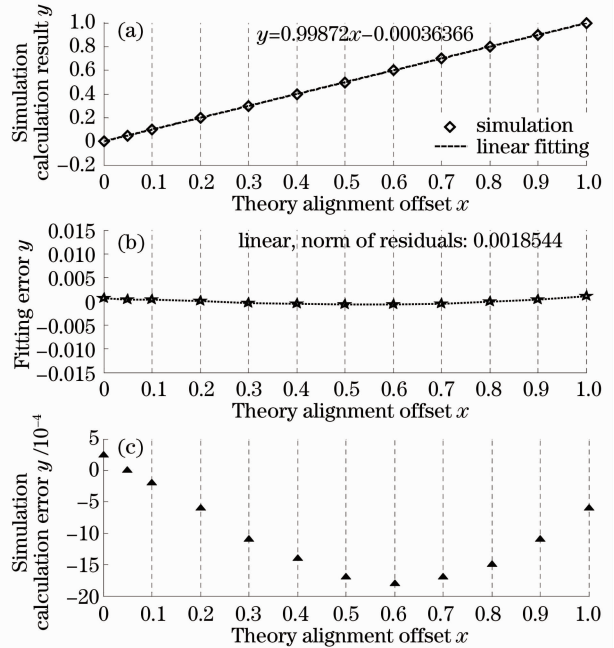


图 6 模拟计算

Fig. 6 Simulation calculation

同时从(5)式分析发现,当硅片相对于掩模运动半个平均周期时,上下两组条纹相对运动一个条纹周期,对应的相位差为  $2\pi$ 。当硅片与掩模完全对准时,上下两组条纹相位分布相同。当  $\Delta x = \bar{P} \times k / 2 = 2 \times P_1 P_2 / (P_1 + P_2) \times k / 2, k = 0, 1, 2, 3, \dots$  时,此时两标记光栅的偏差为平均周期的半整数倍,上下两组条纹完全重合[如图 1(d)],相位差为  $2\pi$  的整数倍。因此,透射式对准方案的可测量范围与硅片掩模上的对准光栅标记密切相关,对准动态测量范围小于 0.5 个平均周期。通常需要粗对准标记将对准范围缩小到这一测量范围。

## 5 结 论

对准技术作为衡量光刻系统综合性能表现的主要技术之一,其地位显得异常重要。基于双光栅叠

栅条纹的接近接触式对准方案,理论上具有纳米级(低于 10 nm)的对准精度<sup>[1~3]</sup>。提出了一种基于对准模型的反射对准光路。在不考虑光刻工艺的情况下,对反射式光路模型的形成叠栅条纹的内在机制进行了深入的分析,当对准偏差  $\Delta x < 1$  pixel 时,最大误差小于 0.002 pixel。通过傅里叶变换分析的方法,得出结论:采用反射式对准方案仍然可以有效提取反应掩模与硅片相对位置关系的差频  $f_1 - f_2$  叠栅条纹。然而,硅片对准光栅标记通常会受到光刻工艺的影响,反射式对准方案模型还需要进一步改进。因此,下一步研究工作的重点将集中于对准标记优化设计、考虑光刻工艺的改进型数学模型等问题的研究。

### 参 考 文 献

1 Zhou Shaolin, Yang Yong, Zhao Lixin *et al.*. Tilt-modulated spatial phase imaging method for wafer-mask leveling in proximity

- lithography[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(18): 3132~3134
- 2 S. L. Zhou, Y. Q. Fu, X. P. Tang *et al.*. Fourier-based analysis of moiré fringe patterns of superposed gratings in alignment of nanolithography[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(11): 7869~7880
- 3 Zhou Shaolin, Yang Yong, Chen Wangfu *et al.*. Dual-grating-based nanometer measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 702~706  
周绍林, 杨 勇, 陈旺富 等. 基于双光栅的纳米测量方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 702~706
- 4 M. C. King, D. H. Berry. Photolithographic mask alignment using moiré techniques [J]. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(11): 2455~2457
- 5 A. Moel, E. E. Moon, R. D. Frankel *et al.*. Novel on-axis interferometric alignment method with sub-10 nm precision[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1994, **11**(6): 2191~2194
- 6 E. E. Moon, M. K. Mondol, P. N. Everett *et al.*. Dynamic alignment control for fluid-immersion lithographies using interferometric-spatial-phase imaging[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2005, **23**(6): 2607~2610
- 7 Y. Uchida, S. Hattori, T. Nomura. An automatic mask alignment technique using moiré interference[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1987, **5**(1): 244~247

栏目编辑:李文喆